

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.Г. RC-генераторы синусоидальных колебаний. — М.: Связь, 1976. — 208 с.
2. Сигорский В.П., Петренко А.И. Алгоритмы анализа электронных схем. — М.: Советское радио, 1976. — 608 с.
3. Волгин Л.И. Методы топологического преобразования электрических цепей. — Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1982. — 108 с.
4. Рыбин Ю.К. Электронные устройства. — Томск: Изд-во «Печатная мануфактура», 2003. — 264 с.

Поступила 12.09.2010 г.

УДК 621.373.4/.5:681.8

СОГЛАСОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АППАРАТОВ

В.Н. Хмелев, Д.В. Генне, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов, Д.С. Абраменко

Бийский технологический институт

E-mail: vnh@bti.secna.ru

Статья посвящена решению проблемы согласования пьезоэлектрической колебательной системы с электронным генератором для поддержания оптимального режима передачи энергии от электронного генератора к пьезоэлектрической колебательной системе. Представлены результаты, подтверждающие эффективность предложенного способа согласования.

Ключевые слова:

Ультразвук, пьезоэлектрическая колебательная система, согласование, компенсация, резонансная частота.

Key words:

Ultrasonic, piezoelectric oscillation system, matching, compensation, resonance frequency.

Для ультразвуковой (УЗ) обработки технологических сред и материалов используются аппараты, обеспечивающие преобразование электрической энергии промышленной сети в УЗ колебания и ввод их в обрабатываемую среду. Независимо от назначения, УЗ аппараты состоят из электронного генератора и УЗ колебательной системы (УЗКС). Электронный генератор осуществляет преобразование энергии электрической сети переменного тока в электрические колебания УЗ частоты для питания преобразователя УЗКС. Преобразователь обеспечивает преобразование электрических колебаний в механические колебания излучающей (рабочей) поверхности и ввод их в обрабатываемую среду или материал.

Для реализации процесса преобразования в ультразвуковых аппаратах используется магнитострикционные или пьезоэлектрические преобразователи.

В настоящее время, благодаря простоте изготовления и повышенному КПД наибольшее распространение получили УЗКС с пьезопреобразователями.

В ультразвуковом аппарате УЗКС является комплексной электрической нагрузкой на генератор и её непосредственное подключение к нему не обеспечивает максимальной эффективности передачи энергии из-за отсутствия системы согласования. Для выявления причин неоптимального согласования пьезоэлектрического преобразователя и электронного генератора рассмотрим, представ-

ленную на рис. 1 физическую (электрическую) эквивалентную схему замещения колебательной системы с пьезоэлектрическим преобразователем, работающей в нерезонансном режиме (вблизи резонанса) [1].

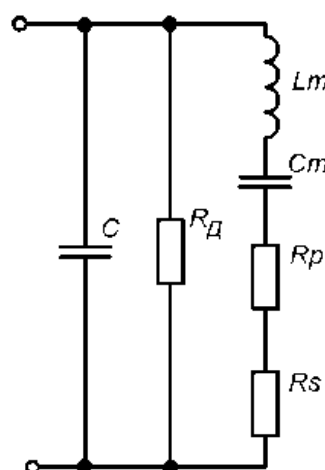


Рис. 1. Эквивалентная схема пьезоэлектрической колебательной системы вблизи резонансной частоты

В представленной схеме [1] индуктивность L_m эквивалентна колеблющейся массе системы, емкость C_m — гибкости, активное сопротивление R_p — сопротивлению механических потерь, R_s — сопротивлению излучения колебательной системы, C —

электрической (статической) емкости преобразователя, R_d — диэлектрическим потерям в пьезоматериале. Сопротивление механических потерь обусловлено внутренним трением частиц материала при колебаниях, а также потерями механической энергии в местах крепления колебательной системы. Сопротивление излучению определяется параметрами системы и пропорционально волновому сопротивлению среды. Электрическая емкость пьезопреобразователя обусловлена геометрическими размерами и диэлектрической проницаемостью используемых пьезокерамических элементов.

На резонансной частоте механического колебательного контура (L_m , C_m) эквивалентная схема системы преобразуется к виду, представленному на рис. 2.

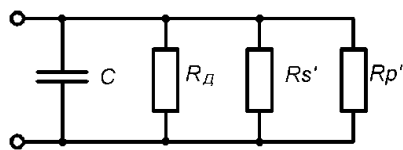


Рис. 2. Эквивалентная схема пьезоэлектрической колебательной системы на резонансной частоте

Здесь R_s' и R_p' — сопротивления, приведенные к параллельной схеме [1]. Как видно из эквивалентной схемы пьезоэлектрической колебательной системы она является комплексной нагрузкой для электронного генератора, определяемой, в основном, электрической емкостью пьезопреобразователя. Прямое подключение такой нагрузки к электронному генератору приводит к снижению эффективности передачи энергии в нагрузку и к снижению эффективности УЗ воздействия на обрабатываемые среды или материалы. Для обеспечения максимальной эффективности передачи акустической энергии в обрабатываемые среды необходимо обеспечивать согласование электронного генератора и пьезоэлектрической колебательной системы.

В общем случае, входной импеданс УЗКС и выходной импеданс генератора являются комплексными величинами и могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{cases} Z_{УЗКС} = a_{УЗКС} + b_{УЗКС} j \\ Z_r = a_r + b_r j \end{cases},$$

где $Z_{УЗКС}$ — импеданс пьезоэлектрической колебательной системы; $a_{УЗКС}$ и $b_{УЗКС}$ — активная и реактивная составляющие импеданса системы; Z_r — выходной импеданс генератора; a_r и b_r — активная и реактивная составляющие импеданса генератора.

Активная составляющая импеданса пьезоэлектрической колебательной системы определяется конструктивной схемой (геометрическими размерами) УЗКС, а также средой в которую вводятся УЗ колебания. Реактивная составляющая импеданса УЗКС определяется размерами и свойствами материала системы (проявляется при работе на нерезонансной частоте), средой в которую вводятся ультразвуковые колебания. Кроме того реактивная

составляющая включает в себя емкостную составляющую, обусловленную диэлектрическими свойствами пьезокерамических элементов.

Таким образом, для согласования необходимо обеспечить работу УЗКС на резонансной частоте, при этом выходное активное сопротивление генератора должно быть минимальным (согласование по напряжению), а реактивные емкостные составляющие системы должны компенсироваться реактивными индуктивными составляющими выходного каскада генератора.

$$\begin{cases} a_r \ll a_{УЗКС} \\ |b_r| = |b_{УЗКС}| \\ f = f_{резонанса} \end{cases}$$

Поскольку колебательная система, работая на своей резонансной частоте, является электрической активно-емкостной нагрузкой для генератора, а его выходное сопротивление, как правило, является чисто активным сопротивлением, для компенсации статической емкости пьезопреобразователя используется способ согласования, представленный на рис. 3. При его реализации, последовательно с пьезопреобразователем включается дроссель [2]. Индуктивность дросселя выбирается такой, чтобы резонанс последовательного электрического колебательного контура, образованного индуктивностью дросселя электрической емкостью пьезопреобразователя находился на несколько (4...5) кГц выше частоты механического резонанса всей системы. Неполное соответствие частоты электрического контура и частоты механических колебаний системы устанавливается для уменьшения влияния изменений собственной электрической емкости пьезоэлементов преобразователя [5]. Согласования активных составляющих сопротивления выходного каскада генератора и входного сопротивления системы на резонансной частоте обеспечивается выходным трансформатором генератора.

Такой способ компенсации электрической емкости позволяет приблизить характер электрической нагрузки, подключаемой к генератору, к активному при работе на резонансной частоте УЗКС.

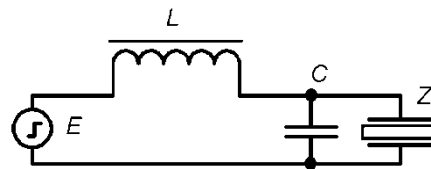


Рис. 3. Компенсация статической емкости пьезоэлектрической колебательной системы

Рассмотренный способ не обеспечивает оптимального согласования, поскольку при изменении температуры системы в процессе эксплуатации изменяется электрическая емкость пьезоэлементов, что влечет за собой изменение условия согласования. Кроме того, происходящие в процессе обработки изменения параметров среды (концентрация

растворенных веществ, эмульгирование, диспергирование, набухание, приводящие к изменению вязкости, акустического импеданса, температуры, давления и т. д.) изменяют параметры колебательной системы, что также приводит к изменению условия согласования.

Для уменьшения влияния изменений собственной электрической емкости пьезоэлементов большинство разработчиков [5] УЗ аппаратов рекомендуют использование дополнительной электрической емкости, подключаемой параллельно пьезоэлементам, рис. 3. Такой подход позволяет уменьшить влияние изменяющейся собственной электрической емкости преобразователя на положение резонанса электрического колебательного контура, однако компенсировать влияние изменений параметров среды на параметры системы такой способ обеспечить не может, как правило КПД ультразвукового технологического аппарата не превышает 50...60 % [5].

Очевидно, что для обеспечения непрерывного оптимального согласования УЗКС с электронным генератором при всех возможных изменениях параметров системы и среды необходимо изменять индуктивность компенсирующего дросселя в процессе эксплуатации УЗ аппарата. Это можно обеспечить несколькими способами.

На рис. 4 представлен наиболее просто реализуемый способ ступенчатого изменения параметров согласующего дросселя, выполненного в виде отдельных, последовательно включенных дросселей. При его реализации изменение индуктивности обеспечивается отключением (замыканием накоротко) необходимого числа дросселей при помощи реле K1 и K2.

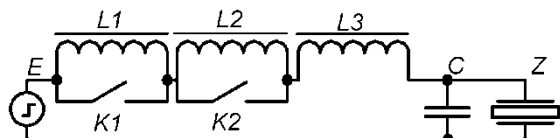


Рис. 4. Способ ступенчатой регулировки индуктивности согласующего дросселя

Такой способ управления индуктивностью не позволяет производить плавную корректировку в процессе работы.

Очевидно, что необходимо обеспечить плавное изменение согласующего дросселя, поэтому последовательно с согласующим дросселем включается добавочный перестраиваемый дроссель рис. 5, в качестве перестраиваемого дросселя может быть применен дроссель с изменяемым воздушным зазором [3].

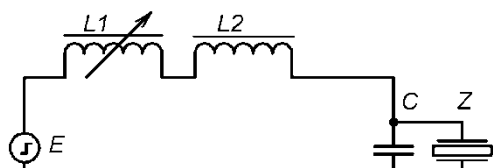


Рис. 5. *Согласующий контур с перестраиваемым дросселем*

Поскольку применение дросселя с изменяемым зазором в сердечнике в маломощных аппаратах нецелесообразно из-за малого быстродействия, больших массогабаритных характеристик и относительно большого энергопотребления, для обеспечения процесса перестройки дросселя при проектировании маломощных УЗ аппаратов (до 1000 ВА) наиболее эффективным является применение дросселей насыщения, в которых индуктивность зависит от тока в обмотке подмагничивания [4].

На рис. 6 представлена схема дросселя насыщения с последовательным соединением рабочих обмоток. Как видно из схемы, дроссель состоит из двух дросселей, силовые обмотки которых соединены последовательно, а обмотки подмагничивания соединены встречно, что позволяет в случае идентичности обмоток дросселей избежать от переменной составляющей в цепи подмагничивания.

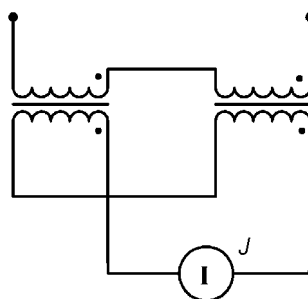


Рис. 6. Дроссель насыщения

Для управления процессом перестройки дросселя необходимо непрерывное получение информации о величине реактивной составляющей импеданса системы, который необходимо компенсировать. Для практической реализации способа непрерывного контроля и управления процессом компенсирования создан специальный управляющий блок, структурная схема которого представлена на рис. 7.

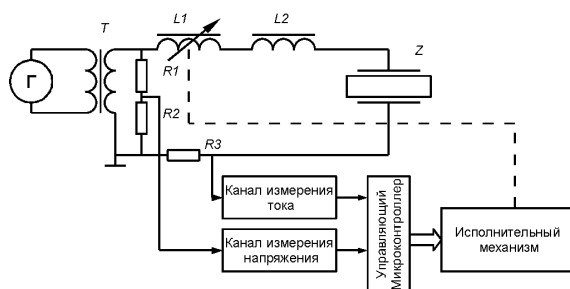


Рис. 7. Структурная схема управляющего блока

На рис. 8 представлен один из возможных алгоритмов работы управляющего микроконтроллера.

При инициализации исполнительного механизма происходит последовательное сведение сердечников дросселя и установка начального зазора в сердечниках дросселя. Далее, после разрешения работы системы согласования, начинается цикл корректировки индуктивности управляемого дросселя. Для этого происходит последовательное изме-

рение фазового сдвига между током в цепи УЗКС и напряжением на входе согласующего устройства. На основании результатов контроля принимается решение о направлении и скорости изменения индуктивности. Далее цикл повторяется до запрета работы системы согласования или при достижении предела изменения индуктивности. В последнем случае выдается сигнал об ошибке.

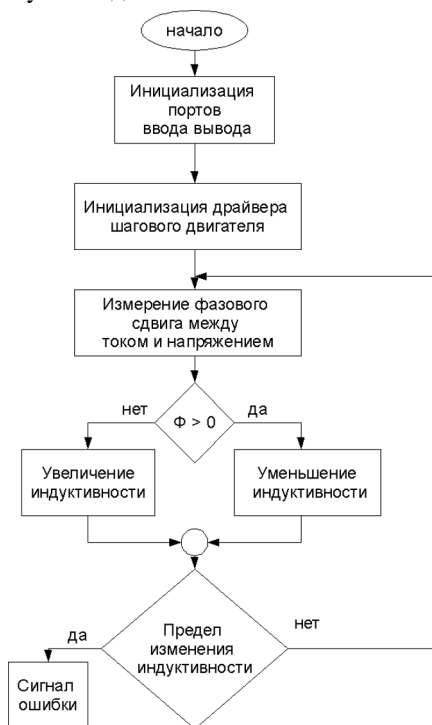


Рис. 8. Блок-схема алгоритма работы блока управления

Для экспериментальной проверки эффективности согласования проведен ряд исследований по измерению акустической мощности, вводимой в жидкую среду (вода) при фиксированной настройке согласующего контура и при использовании системы корректировки в процессе работы. Результаты представлены на рис. 9.

Как следует из представленных зависимостей, вводимая акустическая мощность при фиксированной настройке согласующего контура достаточно быстро снижается, это связано в основном с рассогласованием, вызванным изменением температуры пьезоэлектрического преобразователя УЗКС и изменением свойств обрабатываемой среды. Вместе с тем, при корректировке согласующего контура, вводимая с обрабатываемую среду акустическая мощность снижается незначительно. В целом КПД аппарата с корректируемым дросселем возрастает не менее чем на 10...15 % по сравнению с ультразвуковыми аппаратами, в которых дроссель согласующего контура настроен на некоторое среднее значение.

На рис. 10 представлены фотографии блока управления и дросселя.

На рис. 11 представлена фотография электронного генератора малой мощности, с реализованной в нем системой согласования на основе дросселя насыщения.

Заключение

Разработка системы оптимального согласования выходного сопротивления электронного генератора и входного сопротивления пьезоэлектрической колебательной системы, основанной на реа-

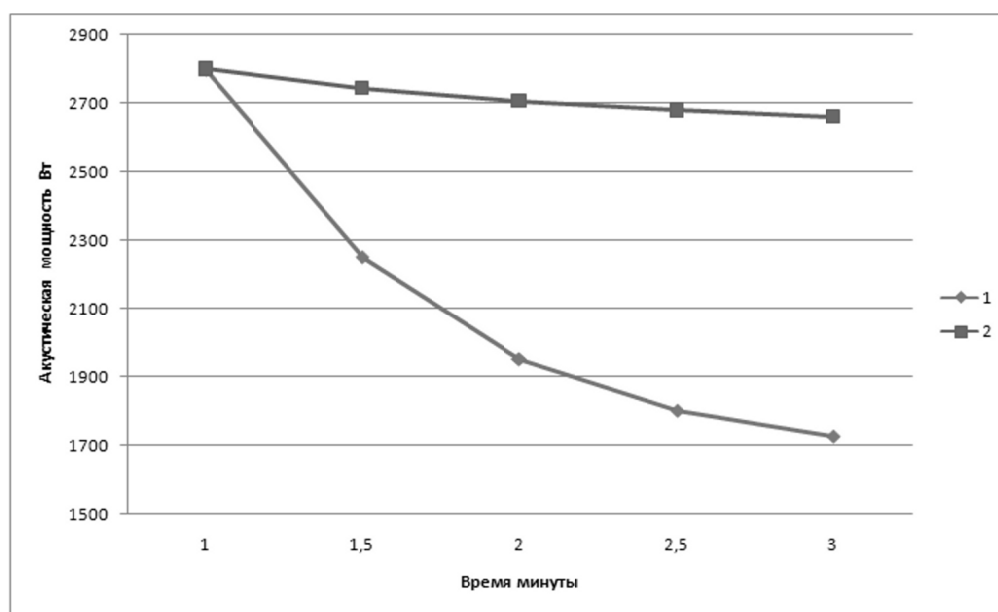


Рис. 9. Изменение акустической мощности в процессе реализации технологического процесса: 1) при фиксированной настройке согласующего контура; 2) при использовании перестраиваемого согласующего контура

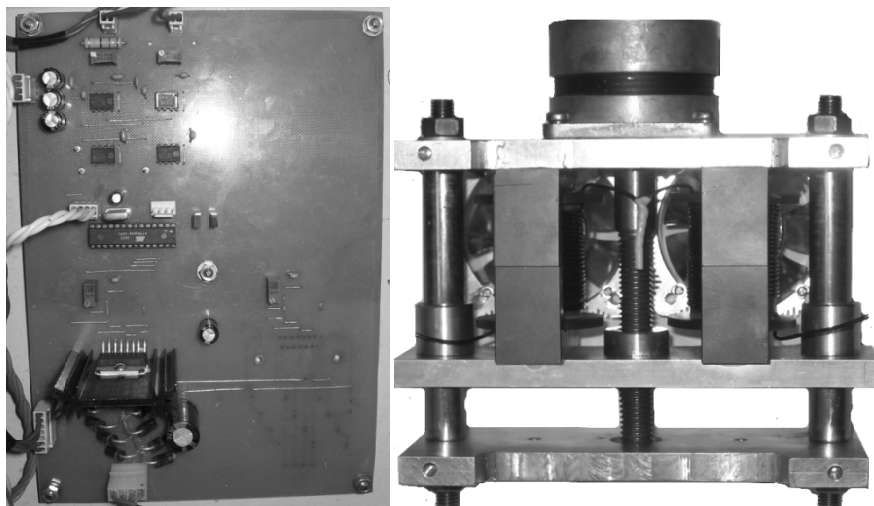


Рис. 10. Элементы системы согласования: Слева блок управления, справа управляемый дроссель с изменяемым зазором

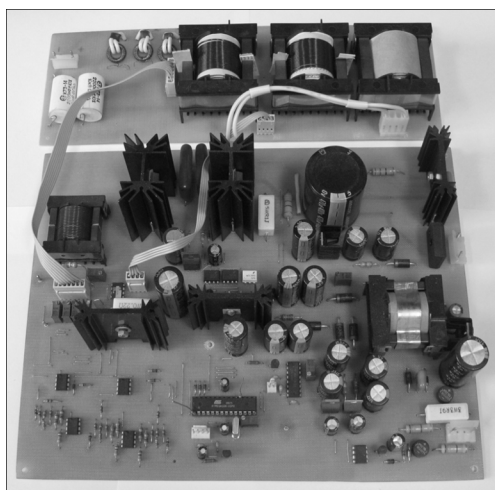


Рис. 11. Ультразвуковой генератор с системой согласования

лизации непрерывного контроля входных электрических параметров колебательной системы и непрерывного изменения индуктивности компенсирующего дросселя обеспечила повышение эффективности ультразвукового воздействия при использовании ультразвуковых технологических аппаратов мощностью до 8 кВА при реализации различных технологических процессов за счет:

- поддержания оптимального режима работы выходного каскада генератора путем постоянного приведения импеданса нагрузки к активной величине при изменяющихся режимах работы;
- оптимальных режимов введения ультразвуковой энергии при любых изменениях в обрабатываемой среде (вязкость, давление, температура);
- повышения электроакустического КПД ультразвуковых технологических аппаратов на 10...15 % по сравнению с традиционным способом согласования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Донской А.В. Ультразвуковые электротехнологические установки. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 208 с.
2. Зернов Н.В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей. – Л.: Энергия, 1972. – 816 с.
3. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Genne D.V. The self-action agreement system of electronic generator with the piezoelectric oscillator system // Intern. Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials – EDM'2007: Workshop Proc. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P. 263–266.
4. Львов Е.Л. Магнитные усилители в технике автоматического регулирования. – М.: Энергия, 1972. – 552 с.
5. Хмелев В.Н., Леонов Г.В., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве. – Бийск: АлтГТУ, 2007. – 414 с.

Поступила 18.06.2010 г.